

Seminář – 3.ročník

Fotosyntéza,
buněčné dýchání

METABOLISMUS

co máme vědět z 1.ročníku:

Metabolismus = základní znak života (výměna látek a energií mezi vnějším a vnitřním prostředím organismu)

Metabolické děje:

Anabolické = z látek jednoduchých se tvoří látky složitější = syntetické

Katabolické = z látek složitých se tvoří látky jednodušší = rozkladné/štěpné

Podle zdroje C a zdroje energie dělíme organismy na:

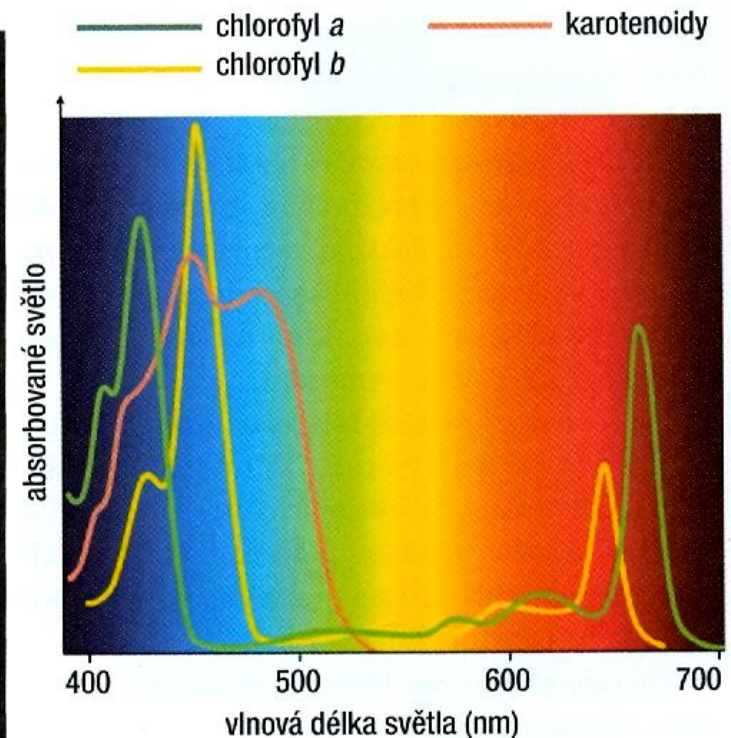
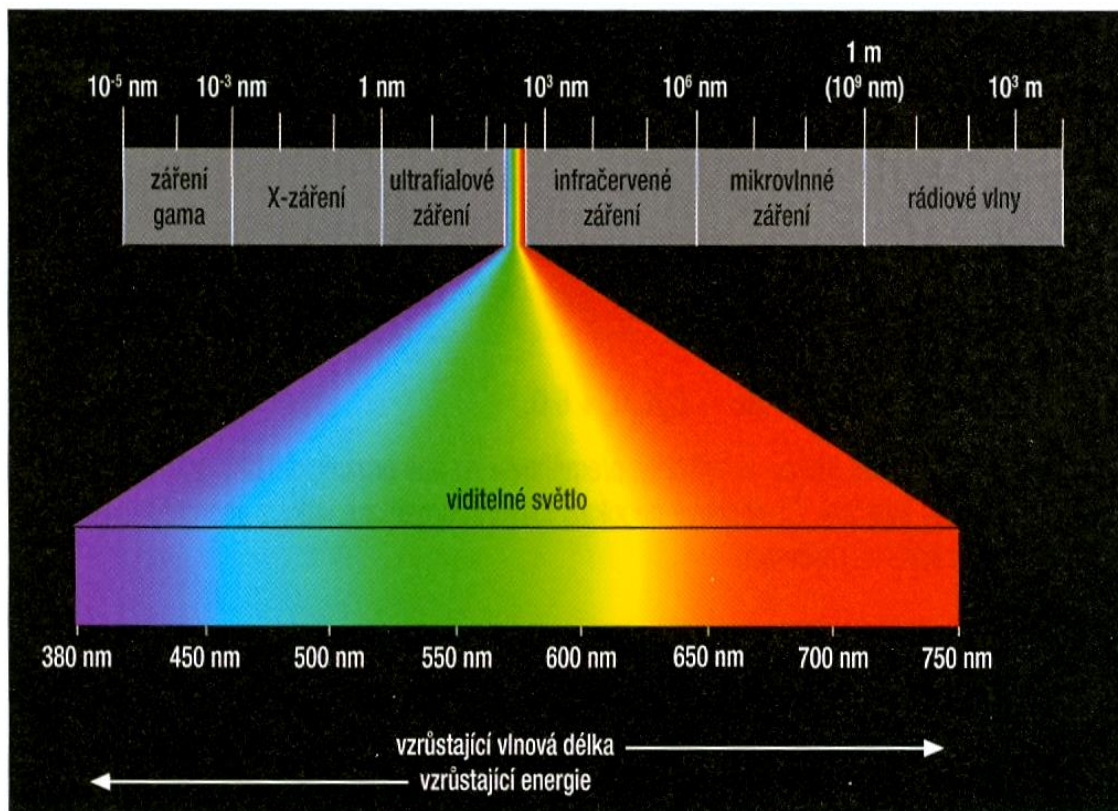
- a) **autotrofní** - zdrojem uhlíku je CO_2
- b) **heterotrofní** - zdrojem uhlíku jsou organické látky (mají štěpné enzymy)
- c) **chemotrofní** – zdrojem energie je oxidace látek
- d) **fototrofní** – zdrojem energie je světelná energie

Fotoautotrofní výživa je v rostlinné říši nejrozšířenější

Zdrojem energie pro metabolické děje je světelná energie (Slunce), zdrojem uhlíku je CO_2

SVĚTLO

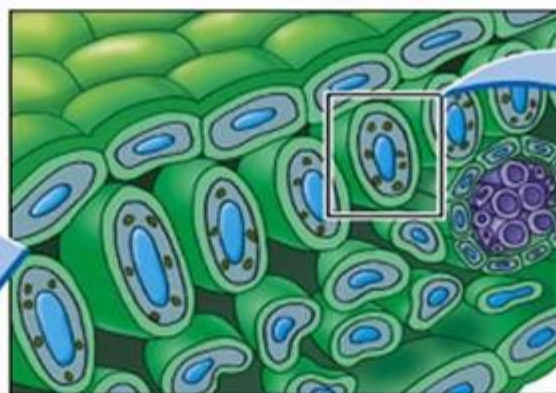
- elektromagnetické vlnění složené z částic = fotonů, které nesou energii
- viditelné světlo rozloženo skleněným hranolem na jednotlivé barvy
- chlorofyl absorbuje červenou a modrou složku
- každý typ fotosyntetických barviv absorbuje mírně odlišnou vlnovou délku
- $1 \text{ nm} = 10^{-9} \text{ m}$



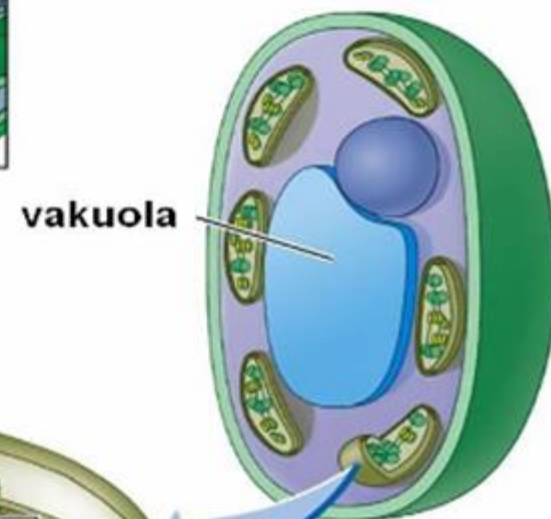
9.3 Graf absorpčního spektra fotosyntetizujících barviv
Absorpční spektra chlorofylu *a*, chlorofylu *b* a karotenoidů.



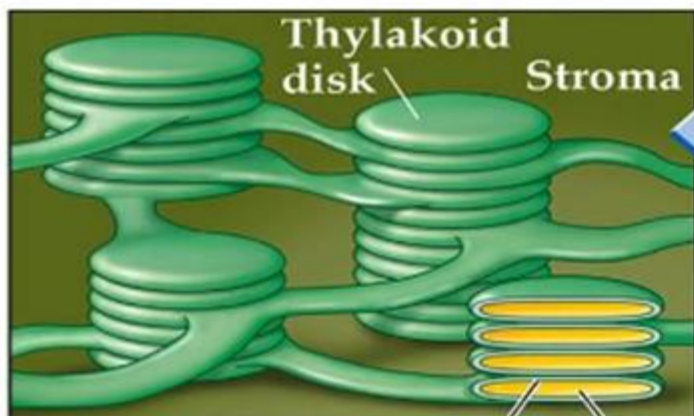
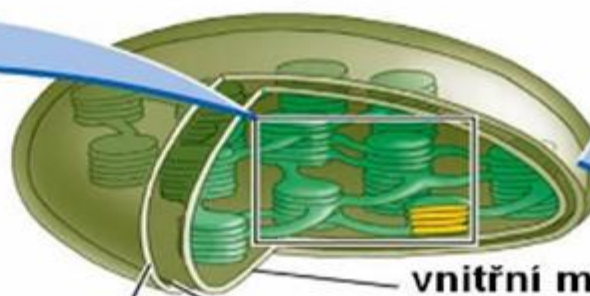
příčný řez listem



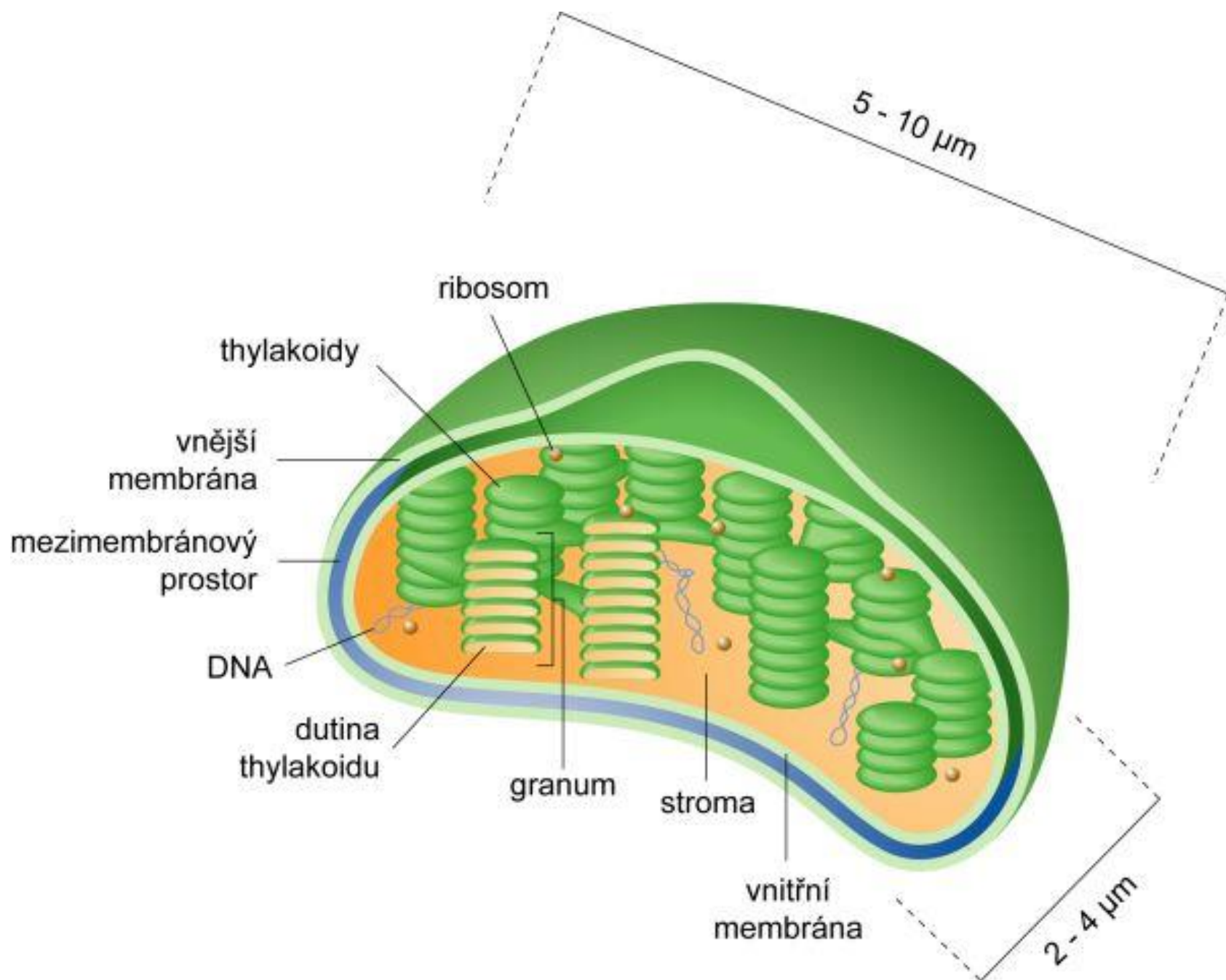
buňka
palisádového
parenchymu

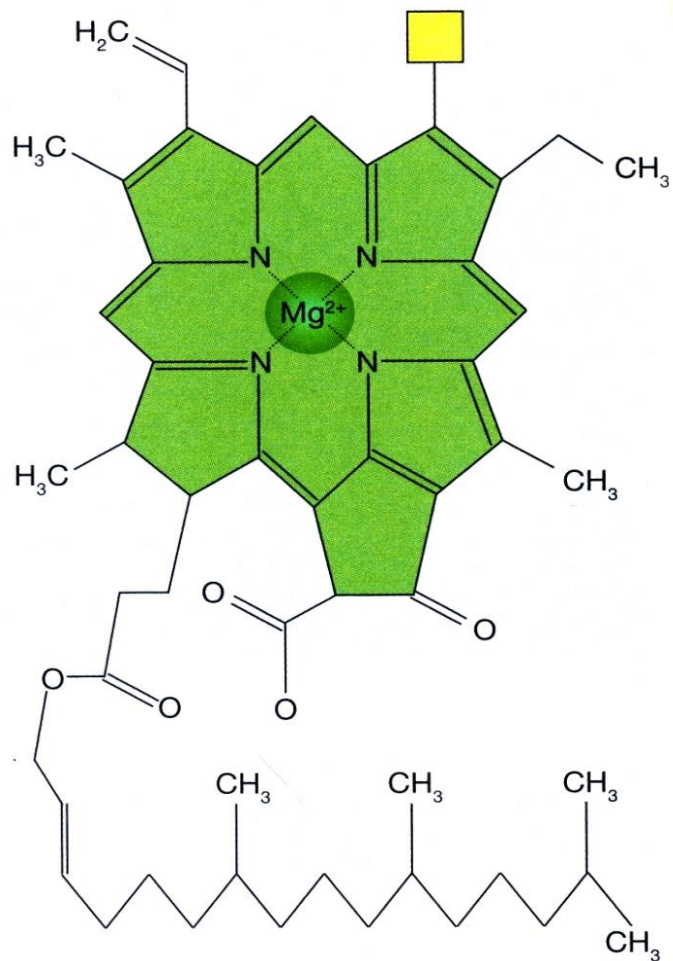


chloroplast

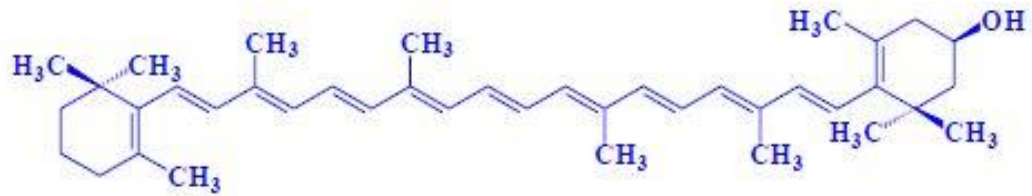


membrána
tylakoidu
vnitřní
prostor
tylakoidu

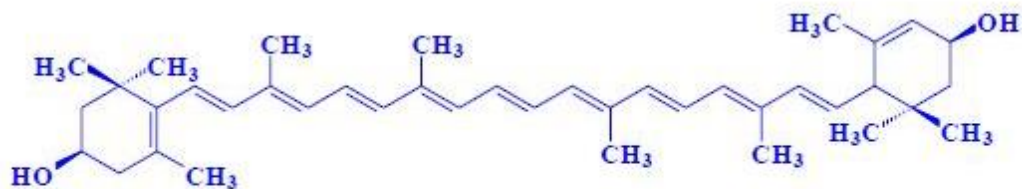




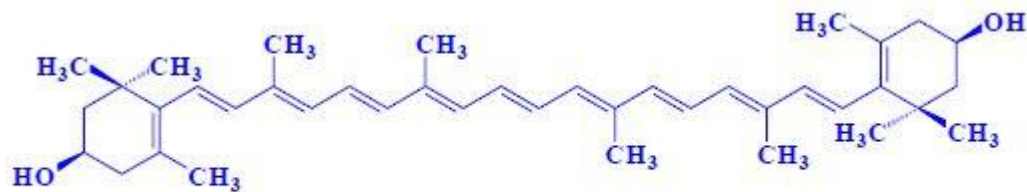
 – CH₃ v molekule chlorofylu a
 – CHO v molekule chlorofylu b



β-karoten



lutein (β-xanthofyl, kukurbitaxanthin)



zeaxanthin

9.2 Chemická struktura chlorofylu *a* a *b*

FOTOSYNTÉZA – ASIMILACE



světlo + chlorofyl

Fotosynteticky aktivní barviva: **chlorofyl a, b, c** - centrálním atomem je **Mg²⁺**

karotenoidy = karoteny + xantofyly

karoteny (β karoten)

xantofyly(violaxantin, zeaxantin, lutein)

Fotosynteticky účinné záření: viditelné světlo vlnové délky 400 - 750nm

- z něj pouze modrá složka (400 – 500nm) a červená (600 – 680nm)

- odražené světlo je vnímáno jako zelené 510 – 535nm

FOTOSYNTÉZA OVLIVNĚNA:

světlo, CO₂, teplota (15-25°C), voda (nedostatek uzavře průduchy = znemožní příjem CO₂...), **množství chlorofylu, minerální výživa, stáří listů...**

Fotosyntéza převede energii světelnou na energii chemickou, ukládanou v různých částech rostlin pro pozdější využití v podobě glukózy, škrobů, tuků a bílkovin

Průběh fotosyntézy:

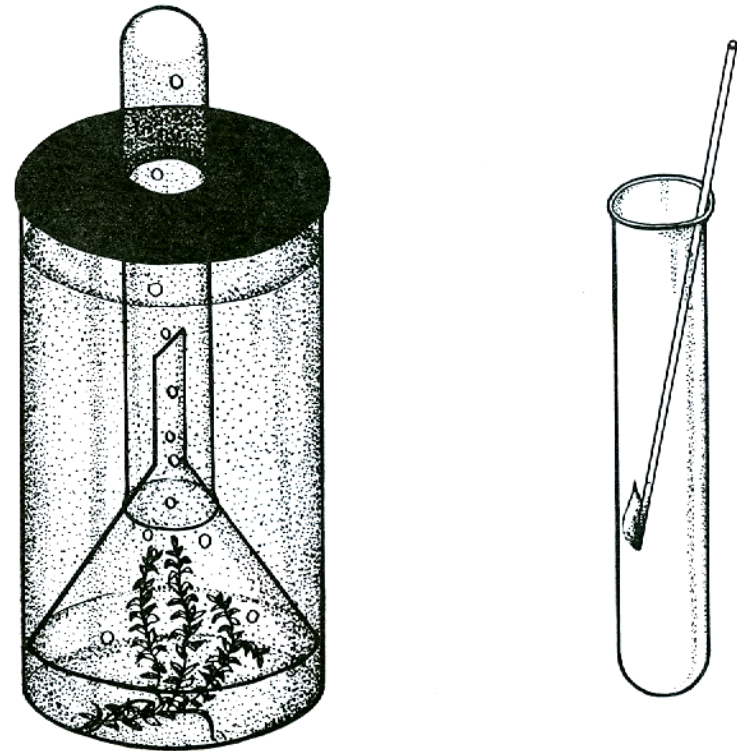
Primární procesy = světelná fáze

- v membránách thylakoidů
- zachycena energie světla
- rozštěpena voda – **fotolýza**
- **vznik ATP, NADPH**
- probíhá jen na světle

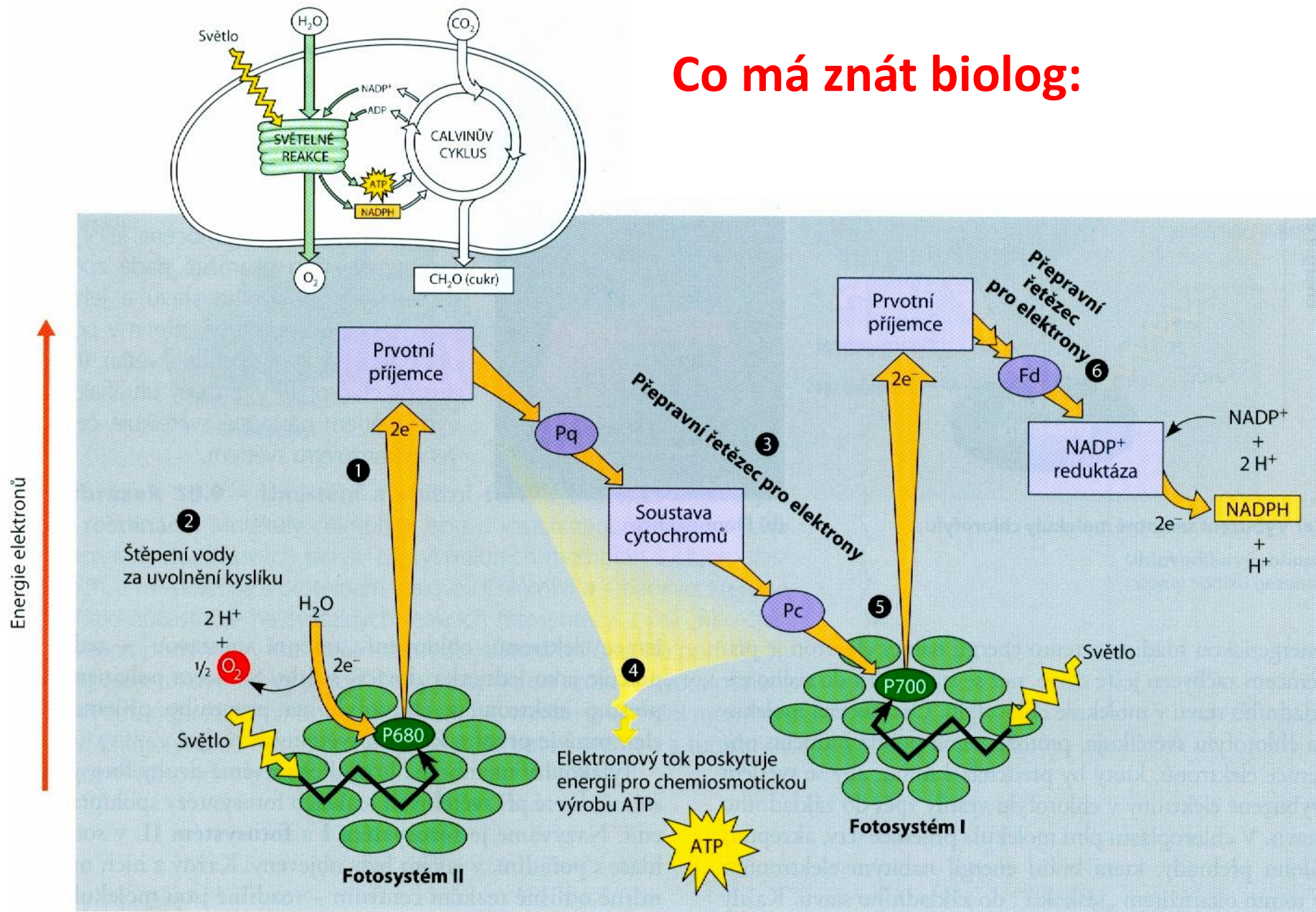
Sekundární procesy = temnostní fáze

- ve stromatu chloroplastů
- vázán C z CO_2 do 3C organické látky – **Calvinův cyklus**
- **následná tvorba glukózy, škrobu, aminokyselin**
- probíhá nezávisle na světle

Důkaz tvorby O_2 - fotosyntéza

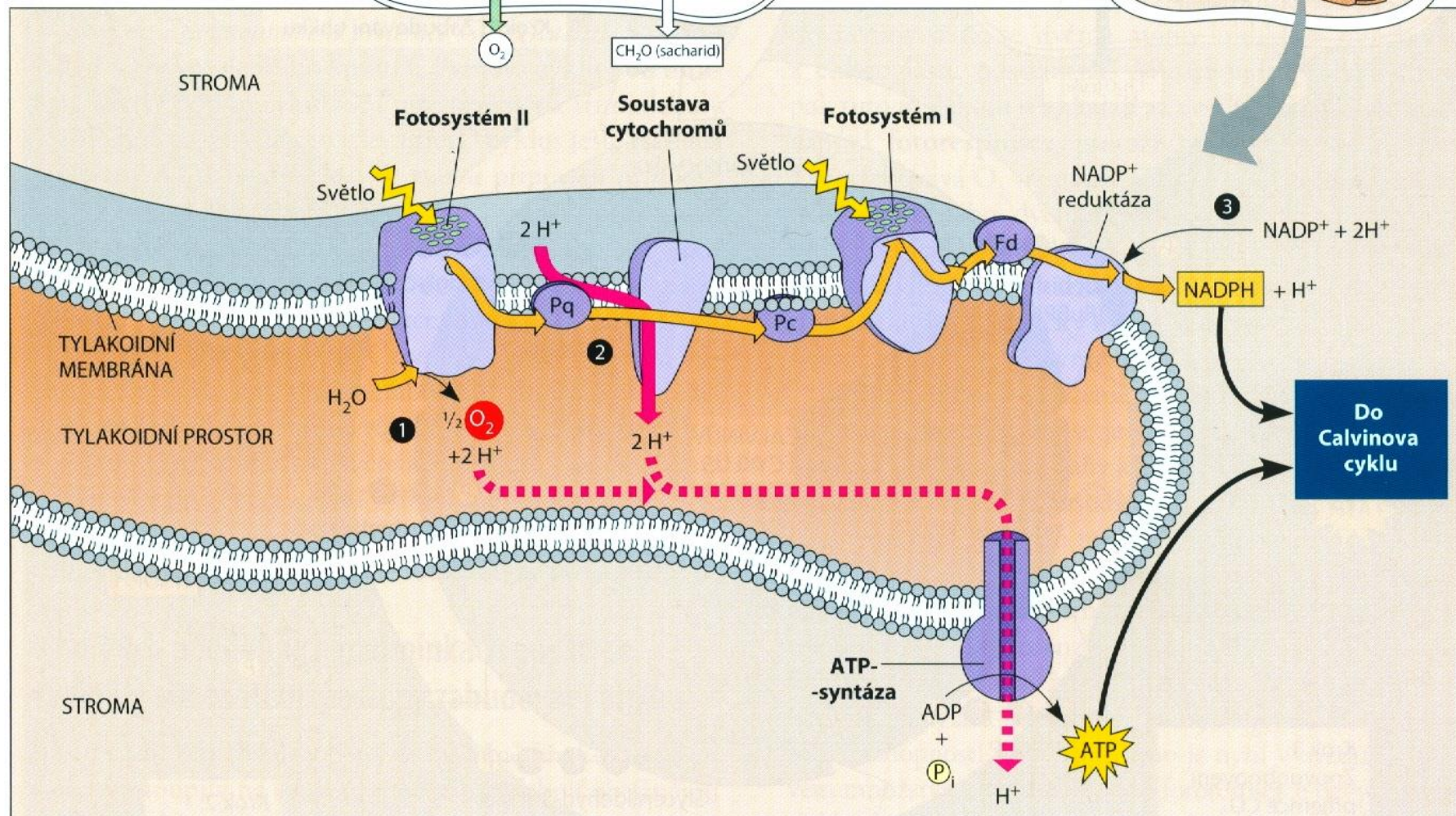
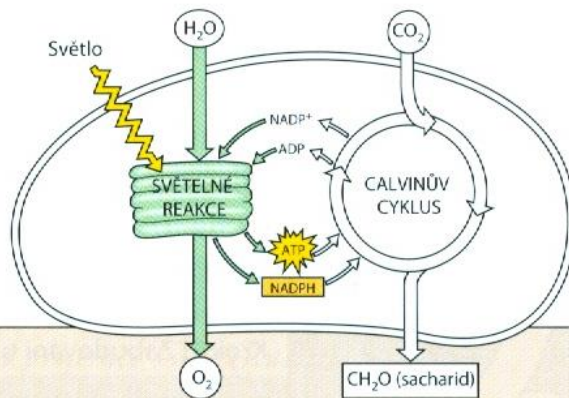


Co má znát biolog:



Světelná fáze fotosyntézy

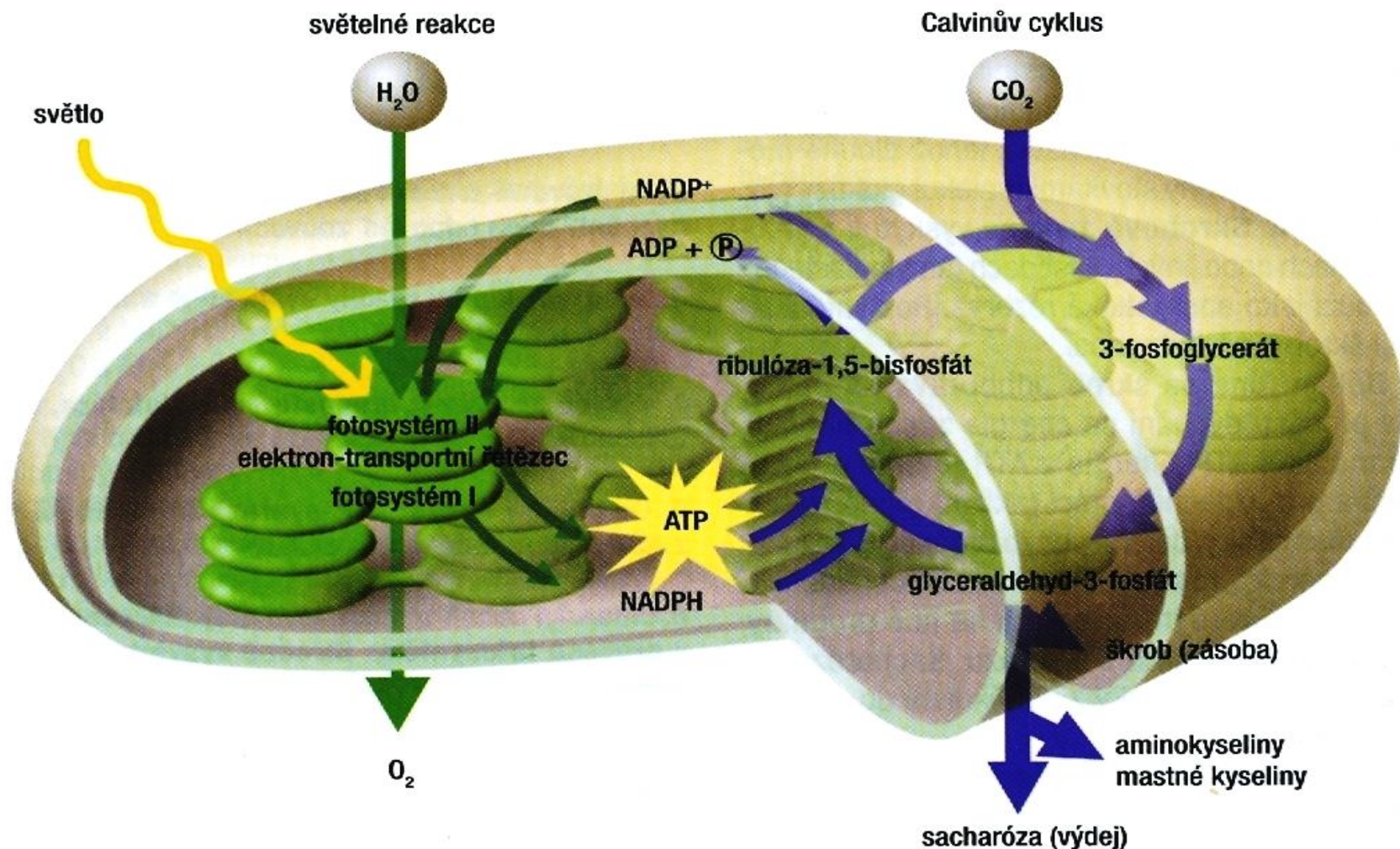
- fotosyntetická barviva vázaná na bílkovinu jsou součástí tylakoidní membrány – fotosystém tvořen několika stovkami molekul barviv
- membrána tylakoidů obsahuje 2 různé fotosystémy s **chlorofylem a** v reakčním centru, citlivé na odlišnou vlnovou délku: **fotosystém I** (P700), **fotosystém II** (P680)
- pohlcení energie barvivem (každý typ barviva pohlcuje fotony o specifické vlnové délce a tím i energii) a předání přes sousední molekuly až k chlorofylu **a** v reakčním centru, kde přijatá energie vybudí elektron
- elektrony **fotosystému II** jsou předávány složitým řetězcem příjemců až na **fotosystém I** za uvolnění energie využitě **pro syntézu 1ATP** (necyklická fotofosforylace) z ADP enzymem ATP-syntázou
- elektrony vybuzené **fotosystémem I** jsou předávány řetězcem odlišných příjemců, energie využita ke tvorbě **1ATP**, elektrony končí až na **NADP⁺** (**nikotinamid adenozin dinukleotidfosfát**) a **vzniká NADPH**
- enzymaticky je štěpena voda za vzniku 2elektronů
($2e^-$ doplní ztrátu ve fotosystému II), $2H^+$ (2protony H), atomu kyslíku
→ O_2 uvolňován z chloroplastu a následně z pletiv
- ❖ **Neuzavřený (acyklický)elektronový tok tvoří ATP a NADPH**



❖ Uzavřený elektronový tok

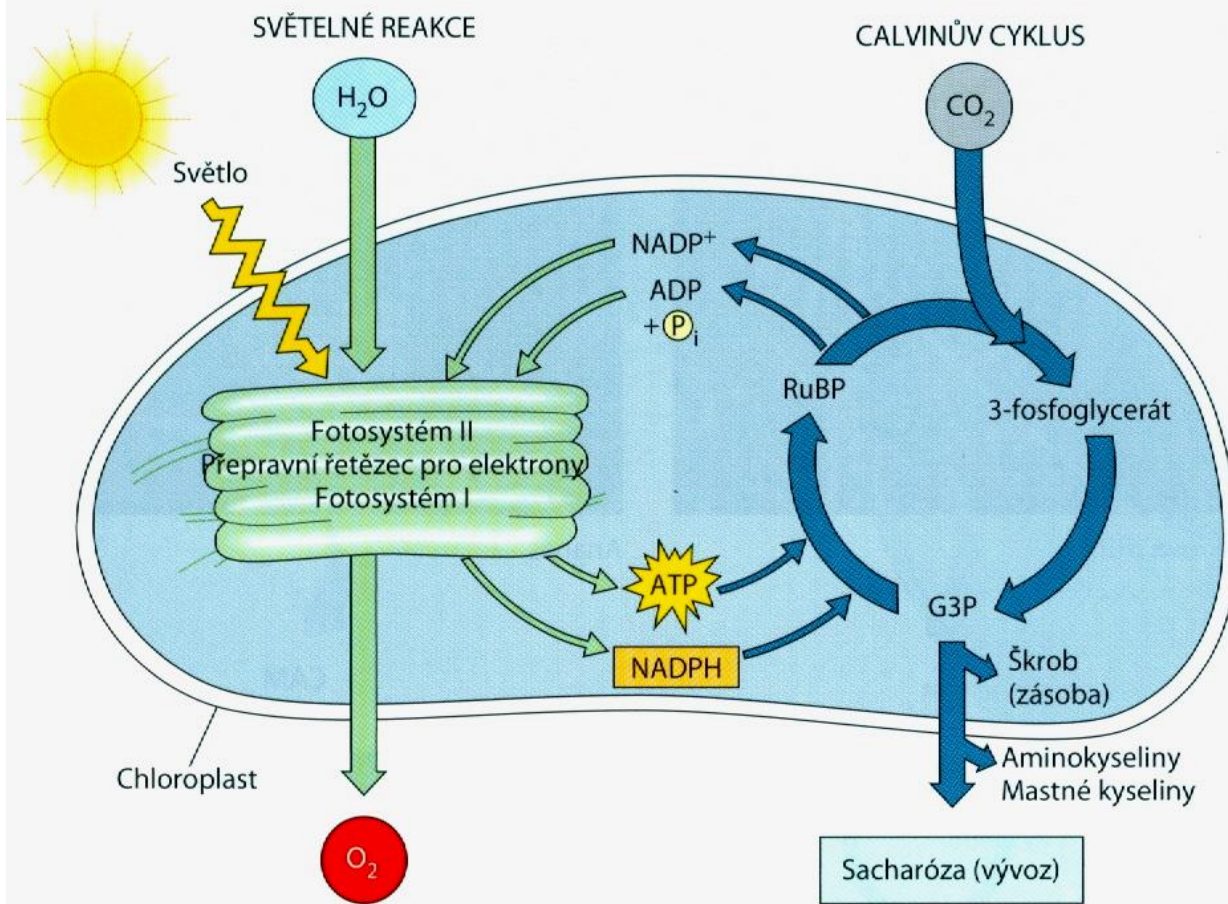
- zahrnuje pouze **fotosystém I**
- vybuzený elektron přechází přes přenašeče a uvolněná energie je použita pouze k syntéze ATP
- pro Calvinův cyklus je zapotřebí více ATP než NADPH a uzavřený elektronový tok tento rozdíl vyrovnává
- koncentrace NADPH v chloroplastu rozhoduje o tom, který elektronový tok bude využíván

- **Calvinův cyklus** = Melvin Calvin (1911 – 1997) američan... 1961 *** Nobelova cena za soubor reakcí, které zabudují CO₂ do organické látky a regenerují substrát
- ribulóza-1,5-bisfosfát (5 uhlíkatá látka 5C) + CO₂ → 6C, která se ihned rozpadá na 2x 3C
- reakci katalyzuje **enzym Rubisco** (ribulóza-1,5-bisfosfátkarboxyláza)
- prvním stabilním meziproduktem je 3-fosfoglycerát (3 uhlíkatá látka), proto se rostliny s tímto typem fixace CO₂ označují jako **C3 rostliny**
- **Celkem 10 meziproduktů za účasti 11 enzymů**



9.11 Souhrn fotosyntézy

Schéma znázorňuje hlavní látky vstupující do procesu fotosyntézy a hlavní produkty při fotosyntéze vznikající. Fotosyntéza probíhá v chloroplastech zelených rostlin. Světelné reakce přeměňují světelnou energii na chemickou energii uloženou v ATP a NADPH. Molekuly pigmentů a bílkovin, jež vytvářejí dva fotosystémy a elektron-transportní řetězec, kde probíhají světelné reakce, jsou zabudovány v tylakoidní membráně. Světelnou reakcí se rozštěpí molekula vody a uvolněný kyslík se dostává do zemské atmosféry. Calvinův cyklus, který se uskutečňuje ve stromatu chloroplastů, využívá ATP a NADPH k přeměně CO_2 na cukry. Přímým produktem Calvinova cyklu je tříuhlíkový cukr glyceraldehyd-3-fosfát. Enzymy přítomné v chloroplastech a cytoplazmě přemění tento cukr v různé organické látky (glukózu, škrob, sacharózu, mastné kyseliny, aminokyseliny). Z Calvinova cyklu se vrací ADP , anorganický fosfát a $NADP^+$ zpět do světelných reakcí.



Světelné reakce:

- Jsou prováděny molekulami v tylakoidní membráně
- Přeměňují světelnou energii na energii chemickou v ATP a NADPH
- Štěpí H_2O a do ovzduší uvolňuje O_2

Reakce Calvinova cyklu:

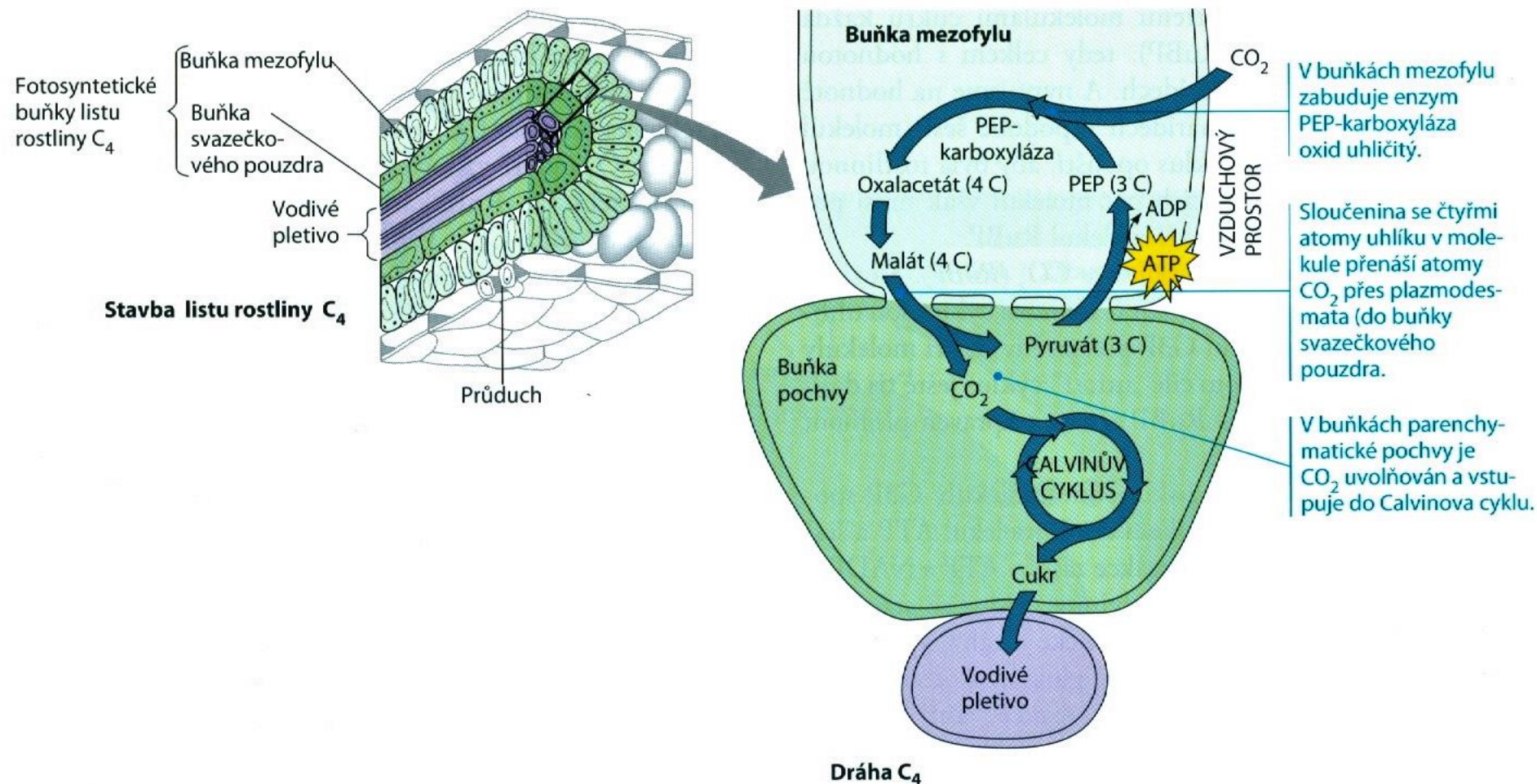
- Odehrávají se ve stromatu
- Využívají ATP a NADP při přeměně CO_2 na cukr G3P
- Vracejí do světelných reakcí ADP, anorganický fosfát a $NADP^+$

Obrázek 10.20 – Přehled fotosyntézy. Tento náčrtek nastiňuje hlavní vstupy a výstupy světelných reakcí a Calvinova cyklu tak, jak probíhají v chloroplastech rostlinných buněk. Celá tato navzájem provázaná činnost závisí na stavební celistvosti chloroplastu a jeho membrán. Enzymy v chloroplastu a cytosolu přeměňují glycerinaldehyd-3-fosfát (G3P) – přímý produkt Calvinova cyklu – na řadu dalších organických sloučenin.

Na vytvoření 1 G3P je potřeba 9 ATP a 6 NADPH a 3 CO_2

Fotorespirace C3 rostlin/ C4 / CAM rostliny

- za horkých dní se průduchy uzavírají, $\downarrow$ CO_2 $\uparrow$ O_2 uvnitř mezofylu listů
- enzym Rubisco do cyklu zařazuje **kyslík místo CO_2** a 5 uhlíkatý cukr se štěpí na 3C a 2C sloučeninu
- 2 uhlíkatá sloučenina odchází z chloroplastu do mitochondrií a peroxizomů, kde je rozložena na CO_2
- **nevzniká žádná ATP**, odvádí se organický materiál = **snižuje se výtěžek fotosyntézy** (sója ztrácí 50% zabudovaného organického uhlíku)
- adaptované rostliny na sucho a vysoké teploty vyvinuly jiný způsob řešení problému:
 - a) CO_2 nejdříve váží do 4 uhlíkaté sloučeniny v mezofylu a po uzavření průduchů je rozštěpí v buňkách pochev cévních svazků na CO_2 , které se pak běžným způsobem použije v Calvinově cyklu. Zabrání se vazbě kyslíku na Rubisco a tím se sníží fotorespirace a ztráty (= Hatch-Slackův cyklus).
→ **rostliny C4**
 - b) CO_2 přijímán průduchy jen v noci a je přeměněn do podoby kyselin a uskladněn ve vakuolách. Během dne pak za světla - světelná fáze dodá ATP a NADPH – vyštěpen CO_2 z kyselin a použit pro tvorbu organických látek Calvinovým cyklem. **Rostliny CAM** (kyselinový metabolismus tučnolistých)



Obrázek 10.18 – Stavba listu C_4 -rostliny a C_4 -dráha. Stavba a biochemické pochody v listech C_4 -rostlin jsou vývojovým přizpůsobením se horkému a suchému podnebí. Toto „vylepšení“ udržuje v parenchymatické pochvě takovou koncentraci CO_2 , která upřednostňuje fotosyntézu před fotorespirací.

* Typy fixace CO₂ (pro biology)

- **C4 rostliny** - CO₂ fixován v cytoplasmě buněk mezofylu listu v podobě 4 uhlíkaté sloučeniny (oxalacetát)
- Po transportu do buněk pochvy cévních svazků je CO₂ znovu zabudován Calvinovým cyklem. Zde **karboxylace oddělena prostorově**
- C4 rostliny tak dokáží fixovat CO₂ v prostředí s jeho nižší koncentrací a navíc mají sníženou fotorespiraci
- **CAM rostliny** - rostliny tučnolisté (Crassulaceae) - během dne průduchy zcela uzavřeny - v noci otevřeny. Meziprodukt fixace CO₂ shromažďován ve vakuolách a ve dne probíhá světelná fáze fotosyntézy za vzniku ATP a NADPH⁺ a CO₂ uvolněný z organických kyselin pak znovu zabudován v Calvinově cyklu. Zde **karboxylace odděleny časově**

*Rozdíly mezi rostlinami C3, C4, CAM

Zástupci typů:

C3: řepa, merlík, špenát, svlačec, pšenice, ječmen, oves, hrách, rýže, sója, tabák, ředkev, tykev...

C4: kukuřice, cukrová třtina, lebeda, šáchor, proso, čirok...

CAM: agáve, ananas, kalanchoe, pryšec, kakost, sukulenty, kaktusy...

Rozdíly:

C3: mírné klima, mezofyl rozlišen na houbový a palisádový parenchym, chlorofyl a:b = 3:1, saturace při 1/3 max. ozáření, teplotní optimum 15-25°C, fotorespirace až 1/3 celkové fotosyntézy, roční produkce sušiny 3,3 - 22 t/ha

C4: sucho, vysoká intenzita záření, parenchym, pochvy kolem cévních svazků, chlorofyl a:b = 5:1, nevykazuje saturaci ani při max. ozáření, teplotní optimum 25-40°C, fotorespirace žádná nebo velmi nízká, roční produkce sušiny 16,9 - 38,6 t/ha, vyšší hustota cévních svazků v listech

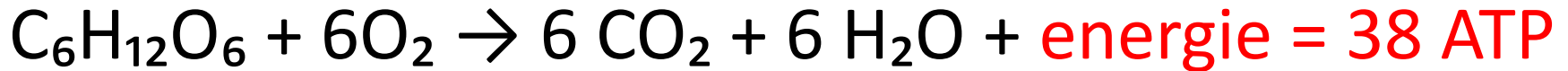
CAM: aridní podmínky, mezofylové buňky s velkými vakuolami, chlorofyl a:b = 3:1, saturace při 1/10 max. ozáření, teplotní optimum 40°C, fotorespirace velmi malá

Význam fotosyntézy

- Nejdůležitější proces na Zemi z hlediska živých organismů
- Ročně se vytvoří přibližně 150 miliard tun organických látek
- Do atmosféry se uvolní 200 miliard tun kyslíku
- Vazba CO_2 do organických látek snižuje jeho množství v atmosféře a tím snižuje tzv. skleníkový efekt (SE zvyšuje teplotu na povrchu Země)
- Rostliny využijí během fotosyntézy jen asi 1-2% celkového množství světelné energie dopadající na Zemi
- Světelná energie rozkládá molekuly vody (fotolýza vody) - takto získaný vodík by mohl být dalším zdrojem energie pro lidstvo
- Bez tvorby organických látek by byla existence všech býložravých, masožravých i organickou hmotu rozkládajících organismů na Zemi nemožná

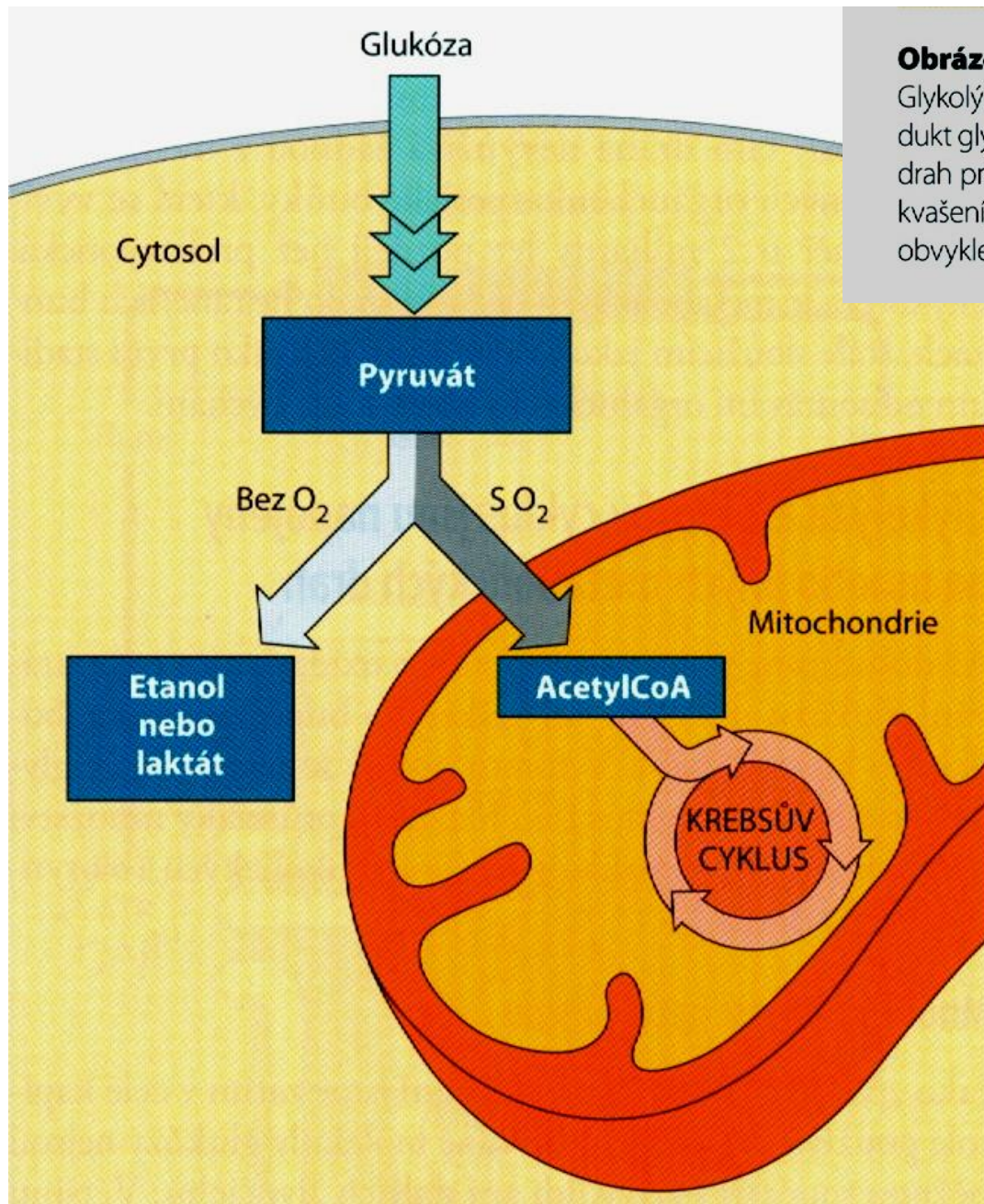
DÝCHÁNÍ - RESPIRACE

Soubor všech rozkladných reakcí, kterými se získává energie uložená v organických látkách (**glukóze, škrobu, bílkovinách, tuku**) - katabolická



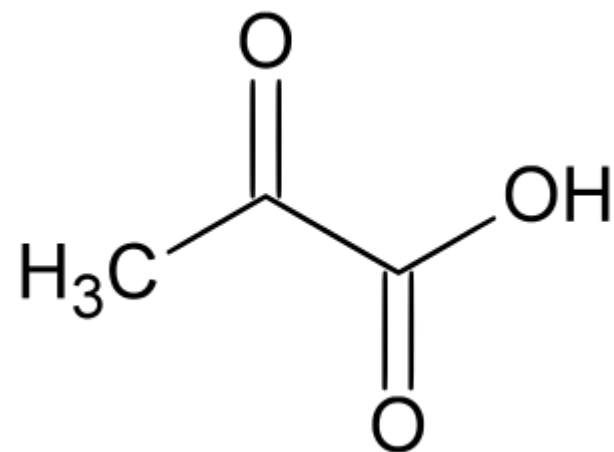
Probíhá v cytoplazmě (glykolýza) a následně pokračuje v mitochondriích všech buněk (tzv. Krebsův cyklus a dýchací řetězec)

- 1) **Glykolýza** = rozklad glukózy na 2 molekuly **pyruvátu** ($\text{CH}_3\text{-CO-COOH}$).....**3C**
 - probíhá **v cytoplazmě** nezávisle na přítomnosti kyslíku
 - **oxidačním činidlem je NAD^+** (*nikotin_amid_adenin_di_nukleotid*)
 - vznikají: **2 molekuly ATP** a **2 NADH** (redukováná forma)
 - a) za **aerobních podmínek** - NADH předává elektrony do dýchacího řetězce a tím se obnovuje zásoba NAD^+ . Pyruvát je následně přeměněn na **acetyl CoA**, který vstupuje do Krebsova cyklu
 - b) za **anaerobních podmínek** jsou elektrony předány na pyruvát (mléčné kvašení), nebo na acetaldehyd (pyruvát - 2CO_2) → etanol (alkoholové kvašení).



Obrázek 9.18 – Pyruvát jako uzlový bod katabolismu.

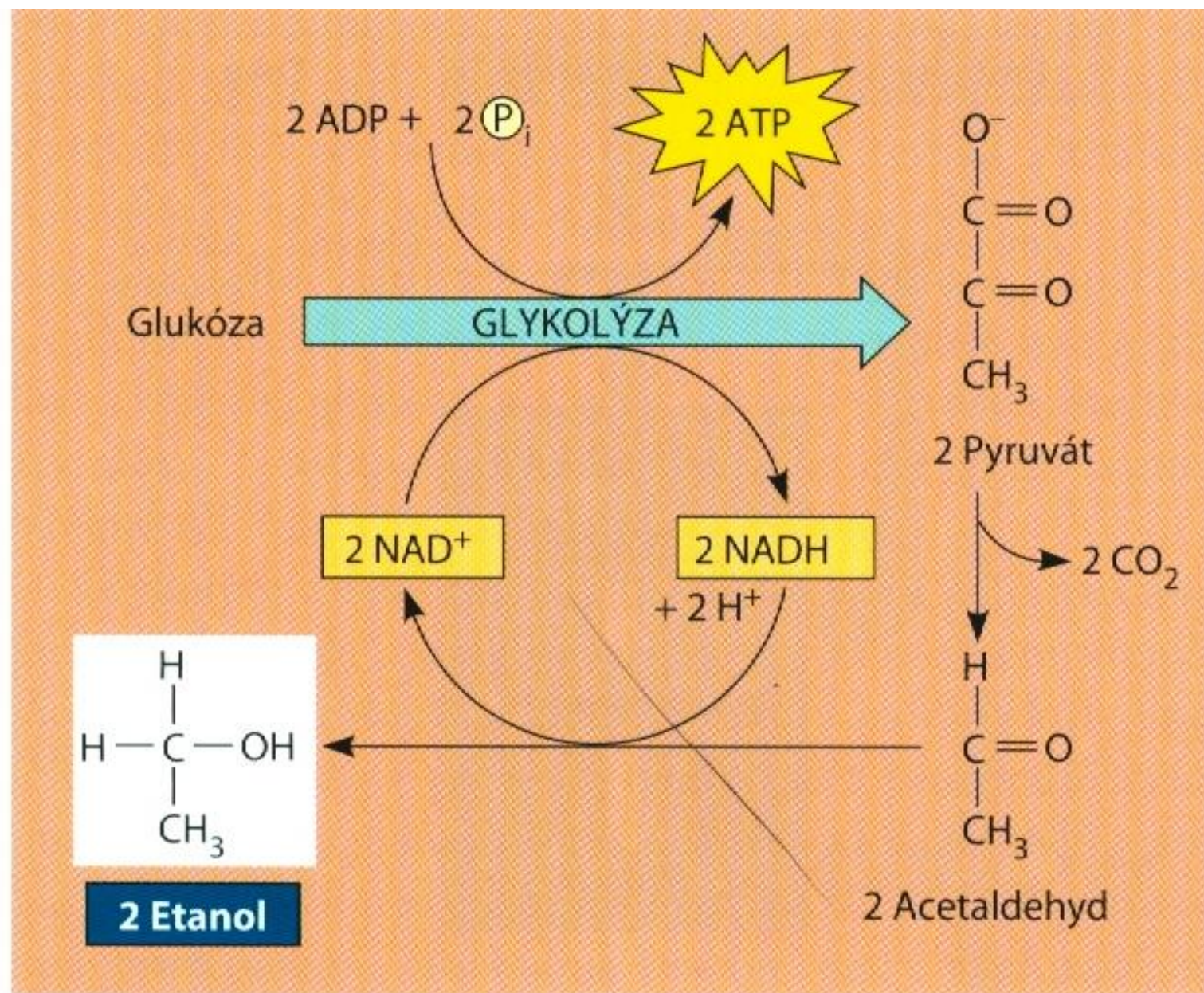
Glykolýza je běžnou součástí kvašení i dýchání. Konečný produkt glykolýzy – pyruvát – představuje „rozcestí“ katabolických drah pro oxidaci glukózy. U buněk schopných jak dýchání, tak kvašení, je pyruvát nasměrován do jedné z těchto dvou drah, obvykle v závislosti na tom, zda je či není přítomen kyslík.



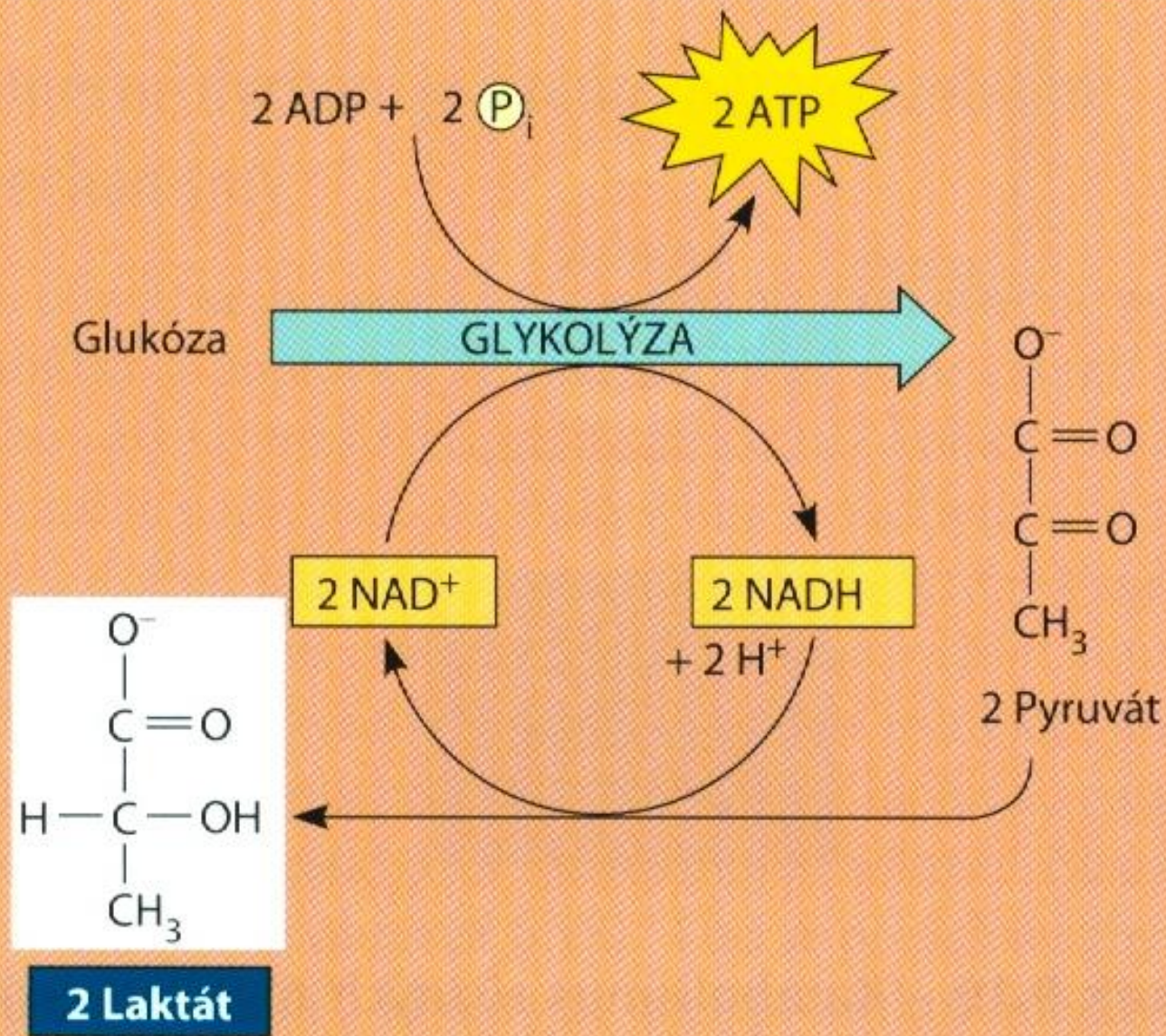
PYRUVÁT ***

...konečným produktem katabolismu uhlíkového řetězce aminokyselin cysteinu, serinu, glycinu, treoninu a alaninu.

...karboxyluje pyruvát na oxalacetát...
 ...na fosfoenolpyruvát (součást glukoneogeneze i glykolýzy).



(a) Alkoholové kvašení

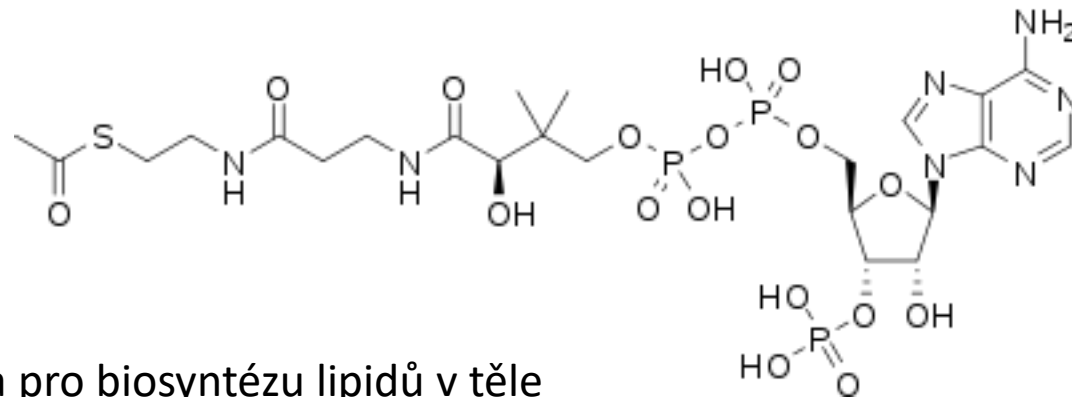


(b) Mléčné kvašení

2) Krebsův cyklus = cyklus kyseliny citronové - **uvnitř mitochondrií (matrix)**

Acetyl CoA vstupuje do Krebsova cyklu – 8 kroků se specifickými enzymy, oxidací se tvoří **CO₂**, většina energie uložena v podobě **NADH** (redukci NAD⁺), **2 ATP**

Acetyl CoA = makroergická sloučenina = energeticky bohatá



- výchozí sloučenina pro biosyntézu lipidů v těle
- součást citrátového cyklu = acetyl-CoA kondenzuje s oxalacetátem (4C) na citrát = kys. citronovou (6C)
- složena: z vitamínu B₅ (kyselina panthotenová) + adenosin s 3fosfátovými zbytky...merkaptethylamin
- v citrátovém cyklu důležité 4 vitamíny B-komplexu: B1, B2 = FAD, B3 = NAD, B5 = CoA

2) Dýchací řetězec

Kristy vnitřní membrány obsahují bílkoviny s funkcí přenašečů elektronů (cytochromy) = **nosiče elektronů z NADH**. Vzniklé H^+ (protony) jsou přečerpávány z matrix do mezimembránového prostoru – tak **vzniká protonový gradient** a protony se chtějí dostat zpět (po koncentračním spádu) – jediné propustné místo je kanál **ATP-syntázy**. Tento bílkovinný komplex využívá energii přechodu H^+ na oxidativní fosforylaci ($ADP \rightarrow ATP$) – celkem vzniká **34 ATP**

Elektrony o nejnižší energii společně s H^+ končí na kyslíku za vzniku vody!!!

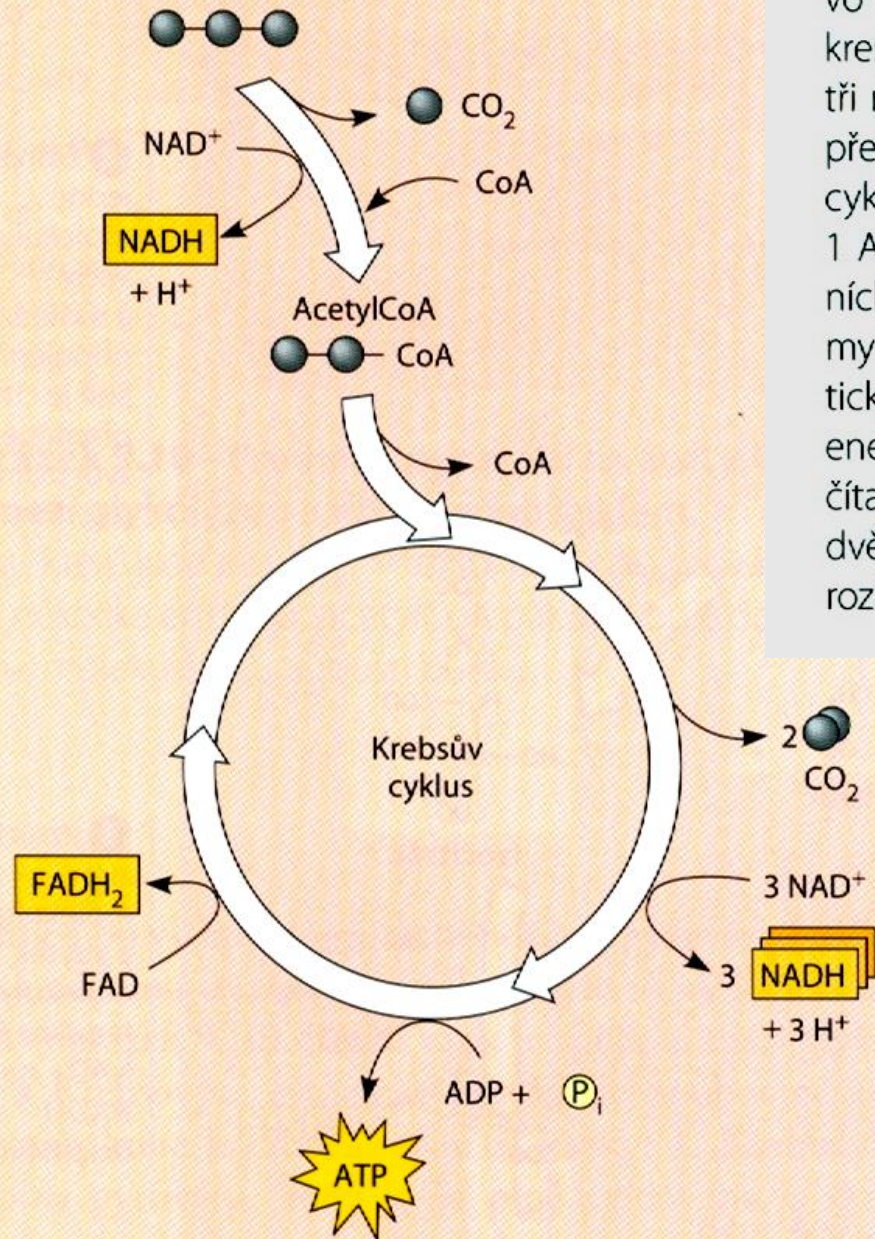
Takto získaná energie 38 molekul ATP (na jednu molekulu glukózy) je použita:

✓ k syntéze jiných organických látek potřebných např.: k růstu buněk, množení buněk

✓ transportu látek proti koncentračnímu spádu přes plazmatickou membránu

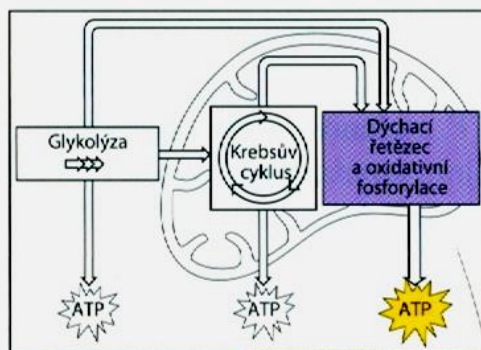
Tuto energii spotřebovávají **všechny nezelené eukaryotní buňky** (pletiva uvnitř rostlinných orgánů, kořeny, květy, plody, klíčící semena, kvetoucí dřeviny bez listů během jarního období/prvoci, houby, živočichové)...

Pyruvát
(z glykolýzy,
2 molekuly na 1 glukózu)



Obrázek 9.12 – Krebsův cyklus v souhrnu. Cyklus funguje jako metabolický „kotel“, který oxiduje organické „palivo“ odvozené od pyruvátu, produktu glykolýzy. Tento náčrt shrnuje vstupy a výstupy cyklu; pyruvát je odbourán na tři molekuly CO_2 – včetně molekuly CO_2 uvolněné během přeměny pyruvátu na acetylCoA těsně před Krebsovým cyklem. Každé „kolo“ cyklu vytváří substrátovou fosforylací 1 ATP, většina chemické energie je však v průběhu redoxních reakcí přenesena na NAD^+ a FAD . Redukované koenzymy – NADH a FADH_2 – vykládají svůj náklad vysoce energetických elektronů do dýchacího řetězce, který využívá energii k vytváření ATP oxidativní fosforylací. (Abyste vypočítali vstupy a výstupy „na jednu glukózu“, vše vynásobte dvěma; každá molekula glukózy je totiž během glykolýzy rozštěpena na dvě molekuly pyruvátu.)

Z 1 molekuly pyruvátu vzniká:
 $1\text{ATP} + 3\text{NADH} + \text{H}^+ + \text{FADH}_2$



Vnitřní
mitochondriální
membrána



Intermembránový
prostor

Proteinový komplex
přenašečů elektronů

Vnitřní
mitochondriální
membrána

$\text{NADH} + \text{H}^+$
(přinášející
elektrony ze živin)

NAD^+

$2 \text{H}^+ + 1/2 \text{O}_2$

H_2O

ATP-syntetáza

$\text{ADP} + \text{P}_i$

ATP

Mitochondriální
matrix

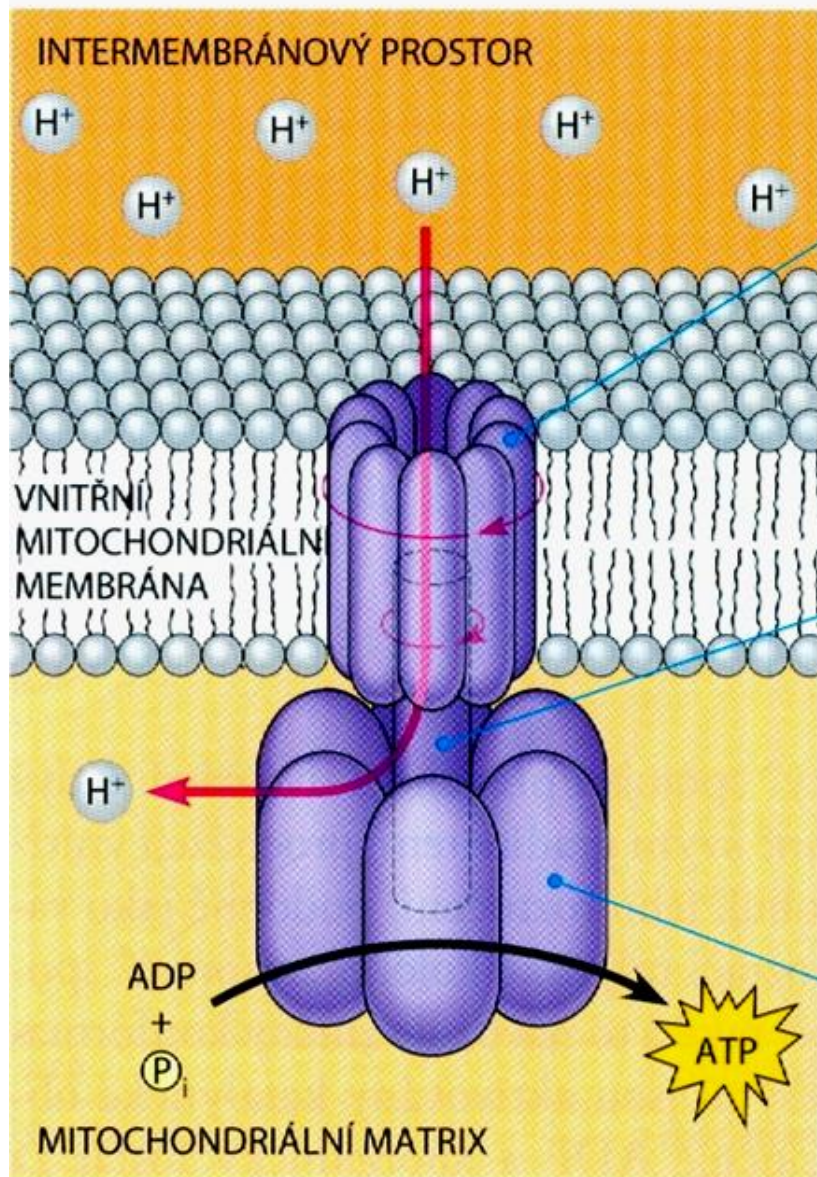
Dýchací řetězec

Přenos elektronů a pumpování
protonů (H^+), které vytváří
protonový gradient napříč membránou

Oxidativní fosforylace

Tvorba ATP poháněná zpětným
průchodem protonů
přes membránu (chemiosmóza)

Protonová pumpa = ATPsyntáza + oxidativní fosforylace



Válnovým „**rotorem**“ uvnitř membrány prochází protony ve směru jejich gradientu; jejich průchodem se „rotor“ roztáčí ve směru hodinových ručiček.

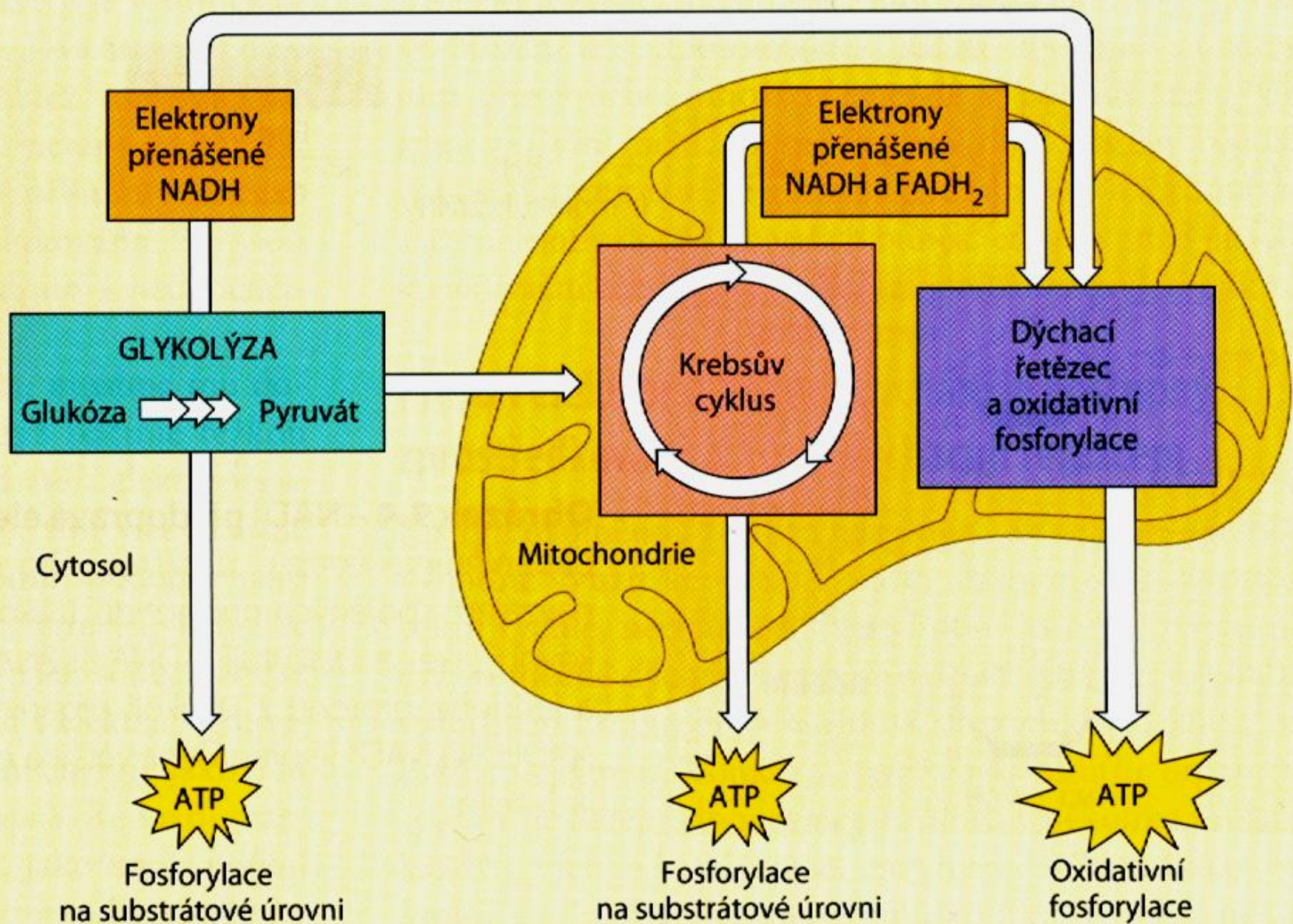
„**Stopka**“ spojující válcový „rotor“ s „knoflíkem“ se také otáčí a při tom aktivuje („probouzí“) katalytické oblasti na „knoflíku“.

Vyčnívající „**knoflík**“ nese katalytické oblasti, které připojují k ADP anorganický fosfát a vytváří tak ATP.

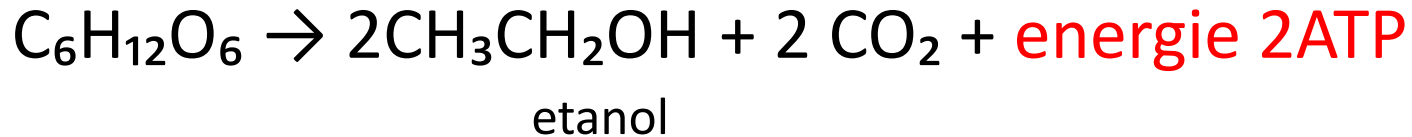
Oxidativní fosforylací v dýchacím řetězci vzniká:
z $1NADH + H^+$: 3ATP
z $FADH_2$: 2ATP

Oxidativní fosforylací v dýchacím řetězci vzniká:

- $1 \text{ NADH} + \text{H}^+ \rightarrow 3 \text{ ATP}$
- $1 \text{ FADH}_2 \rightarrow 2 \text{ ATP}$
- Celkově oxidací 1 molekuly acetyl CoA $\rightarrow 12 \text{ ATP}$ (teoreticky)
z 1 molekuly pyruvátu vzniká: $1 \text{ ATP} + 3 \text{ NADH} + \text{H}^+ + \text{FADH}_2$
 $1 \text{ ATP} + 3 \times 3 \text{ ATP} + 2 \text{ ATP}$
- reálně pouze 10 ATP – na 1 ATP zapotřebí 4 protony přes ATPsyntázu



Bez přístupu kyslíku (**anaerobně**) je rozklad glukózy jen částečný a uvolní se jen část energie = **kvašení**



K tomuto ději dochází při nedostatečném přístupu kyslíku ke kořenům (záplavy, půdní škraloup, zhutněná půda) - **etanol je pro rostliny toxický**

Faktory ovlivňující dýchání:

- Teplota: s rostoucí teplotou buněčné dýchání stoupá (od 45°C klesá)
- Koncentrace O₂: pokles pod optimum znamená přechod ke kvašení
- Koncentrace CO₂: zvyšování vede k poklesu dýchání
- Množství vody: hlavně u semen významný faktor, snižující dobu klíčivosti

Praktické využití:

Plody - dlouhodobé skladování = prodýchání zásobních látek = znehodnocení
proto se ↓teplota, ↑ CO₂ v prostředí

Semena - zvýšení vlhkosti během skladování = klíčení = znehodnocení (ztráta klíčivosti, protože jsou rozštěpeny zásoby energie)

